

2014 年南京青奥会开幕式日降水过程数值模拟研究

查思佳¹ 张慧娇¹ 李逍潇¹ 花少烽¹ 陈宝君^{1,2*}

¹ 南京大学大气科学学院, 南京 210023

² 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081

摘 要 为评估 2014 年南京青奥会开幕式日的人工催化消减雨作业效果, 利用中尺度数值模式 WRF 对当日的云降水过程和催化作业开展数值模拟。本文系第一部分工作。首先对常用的八种云微物理方案的降水模拟效果进行评估, 进一步选取 Thompson 和 Milbrandt-Yau 两个微物理方案对此次降水过程的云系结构和降水形成机制进行对比分析。模拟结果表明, Thompson 和 Milbrandt-Yau 两个方案模拟的云系结构和降水形成的微物理机制是一致的。开幕式当天影响奥体场馆的降水由弱的积层混合云系产生, 降水过程以冰相微物理过程为主。雪的融化是雨水的主要源项, Thompson 方案中雪的融化对雨水的贡献率为 72%, Milbrandt-Yau 方案为 60%, 蒸发则是雨水的主要汇项, Thompson 方案中蒸发对雨水的消耗率达 94%, Milbrandt-Yau 方案为 95.6%。

关键词 人工消减雨, 积层混合云, 冰相微物理过程, 雨水蒸发, WRF 模式

文章编号

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2002.19200

Numerical Simulation of Precipitation Processes during the Opening Ceremony of the Nanjing 2014 Youth Olympic Games

ZHA Sijia¹, ZHANG Huijiao¹, LI Xiaoxiao¹, HUA Shaofeng¹, and CHEN Baojun^{1,2}

¹ School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023

² Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 10081

收稿日期 2020-02-20; **网络预出版日期**

作者简介 查思佳, 女, 1995 年出生, 硕士研究生, 从事云降水物理与人工影响天气研究。E-mail: mg1728003@smail.nju.edu.cn

通讯作者 陈宝君, E-mail: chenbj@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 (41775132), 西北区域人工影响天气能力建设项目 (ZQC-R18210)

Funded by National Natural Science Foundation of China (41775132), and Weather Modification Capacity Construction Program of Northwest China (ZQC-R18210)

Abstract In order to evaluate the effect of cloud seeding operation for rain suppression during the opening ceremony of the Nanjing 2014 Youth Olympics Games, the WRF model was used to simulate the precipitation processes and cloud seeding operation. The present work is the first part of the study. Firstly, the effects of precipitation simulation using eight microphysics schemes were evaluated through comparison with the observation. Furthermore, we chose Thompson and Milbrandt-Yau microphysics schemes to analyze the cloud structures and precipitation formation mechanisms. Results show that the cloud structures and precipitation mechanisms simulated by the two microphysics schemes are consistent. The precipitation affecting the Nanjing Olympic Sports Center on the day of the opening ceremony is generated by the weak mixed convective-stratiform cloud system, and the precipitation processes are dominated by ice-phased microphysical processes. The melting of snow is the main source of rainwater, contributing 72% in Thompson microphysics scheme and 60% in Milbrandt-Yau microphysics scheme, and the evaporation is the main sink term, which consumes 94% of the rainwater in Thompson microphysics scheme and 95.6% in Milbrandt-Yau microphysics scheme.

Key Words Cloud seeding operation for rain suppression, mixed convective-stratiform cloud, ice-phased microphysical processes, rain evaporation, WRF model

1 引言

人工影响天气在我国重大活动气象服务保障方面发挥着重要作用,例如2008年北京奥运会开闭幕式和新中国成立60周年阅兵活动保障。近些年,随着重大活动逐渐增多,对气象服务保障的需求也有所增加。然而,相对于日益增长的业务需求而言,对人工催化消减雨的机理和效果的研究还较少,人工消减雨作业技术目前在全世界范围内也处于科学试验的范畴。因此,开展人工催化消减雨的机理和技术方法研究,对于提高人工影响天气在重大活动中的保障能力和服务水平具有重要意义。

叶家东等(1998)从人工增雨的反效果出发,提出人工催化消减雨的指导思想是设法改变云的自然降水状态或过程,如降低降水效率、提前降水、延缓降水或改变降水空间分布。目前在实际人工消减雨作业中主要采取两种方式,一种是在目标区的上游通过适量催化让降水云系提前降水,另一种是在目标区的上游通

过过量催化抑制降水形成过程，使云系不降水或者在目标区的下游降水。

不管是提前降雨还是抑制降雨，都是通过播撒催化剂影响云物理过程来改变降雨的时空分布。然而，从现有研究来看，催化的影响区域还很不确定，即使上游能够提前降雨或者增雨，也不能保证催化区的下游就一定会减雨（何观芳等, 2001; 史月琴等, 2008; Ćurić et al., 2008; 孙晶等, 2010; DeFelice et al., 2014），这一方面和催化作业方案（催化剂种类，催化的时间、部位及播撒量）有关，另外还与云物理结构及环境场（风场、湿度场）有关（毛玉华和胡志晋, 1993; Chen and Xiao, 2010; 陈宝君等, 2016）。由于地域和气候条件的差异，不同地区降水云的微物理结构和降水形成的微物理过程有着很大差异（何观芳和胡志晋, 1998; Lin et al., 2005）。只有了解云系的微物理和动力结构及降水形成机制，才能进一步科学有效地开展人工催化作业（洪延超和周非非, 2005; 胡朝霞等, 2007; 赵震和雷恒池, 2008; 孙鸿娉等, 2011）。

经过几十年的研究，对我国北方降水云系的微物理结构、降水形成机制及人工影响天气的原理和方法，已有较深入的理解和认识（黄美元等, 2003; 雷恒池等, 2008; 洪延超和雷恒池, 2012; 郭学良等, 2013），对北京 2008 年奥运会和国庆 60 周年庆典活动人工消减雨作业也有分析研究结果（张蕾等, 2009, 2011; 何晖等, 2012）。本文利用中尺度数值模式 WRF，通过选取多种微物理方案，对 2014 年 8 月 16 日南京青奥会开幕式日的降水过程进行高分辨率数值模拟，研究云系微物理特征及降水形成机制，从而为进一步开展催化数值试验和评估催化效果奠定基础。

2 天气背景

从 8 月 16 日 00 时（世界时，下同）500 hPa 高度场和风场图上（图 1a）可以看到，中纬度地区呈现出两槽一脊的环流结构，西风气流中的冷槽向低纬加深，形成一个闭合的冷性涡旋中心，在东北区域上空形成东北冷涡，南京地区处于东北冷涡底部的西南气流中。西太平洋副热带高压位于我国南海区域，将暖湿气流输送到内陆地区，为降水的产生提供了有利条件。700 hPa 高度场上（图 1b）显示，南京地区受到低空切变线影响，有利于上升运动，容易产生云雨天气。

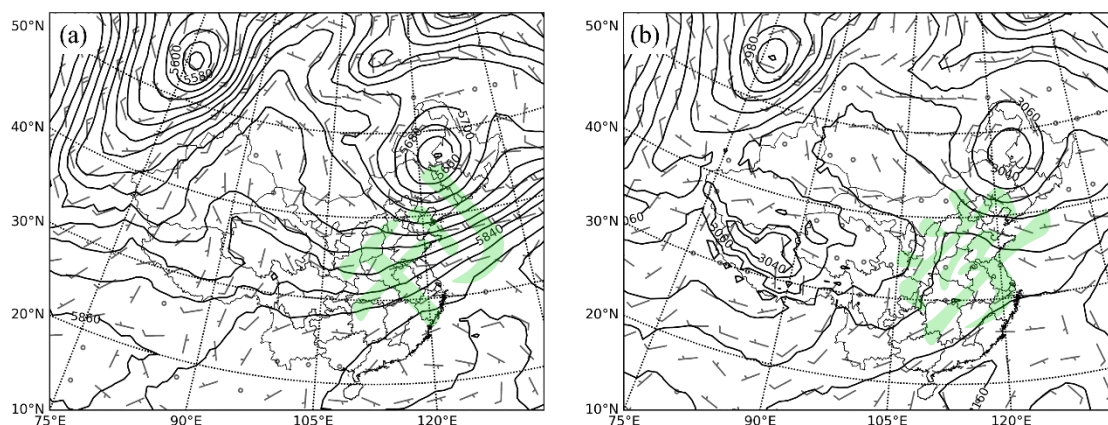


图 1 2014 年 8 月 16 日 00 时天气形势图: (a) 500 hPa; (b) 700 hPa

Fig.1 Synoptic weather patterns at 0000 (UTC) on 16 August 2014: (a) 500 hPa; (b) 700 hPa

图 2 给出了 8 月 16 日南京奥体场馆观测的地面降水量随时间的变化。观测显示, 奥体场馆 11 时 20 分前后开始降雨, 至 14 时累计降雨量达 2 mm, 其中 11 时至 12 时是 1 mm, 12 时至 13 时是 0.8 mm, 13 时至 14 时是 0.2 mm, 从 12 时开始场馆降水呈现减小趋势, 14 时以后降水迅速增强。青奥会开幕式时间段为 12 时至 14 时, 而人工催化作业是从 10 时 20 分开始, 持续作业 2 小时左右。

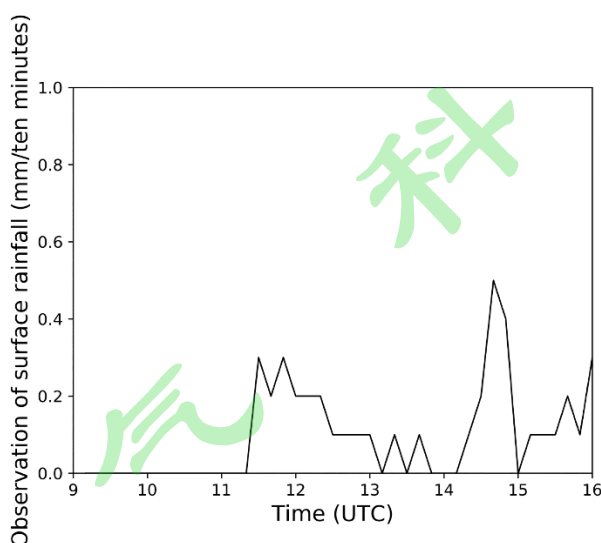


图 2 南京奥体中心测站实测的地面降水量随时间变化 (10 min 雨量)

Fig.2 Rainfall as a function of time measured at the Nanjing Olympic Sports Center station (rainfall within ten minutes)

根据当日 00 时南京站的探空 (图 3a) 显示, 850 hPa 以下层结稳定, 抬升凝结高度较低约为 700 m, 近地层最大相对湿度 88%, 水汽混合比 15 g/kg, 在 500-

800 hPa 区间存在着深厚的干层（最低相对湿度只有 10%左右）。12 时探空图上（图 3c），干层仍然存在，只是高度有所降低位于 700-900 hPa，最低相对湿度增加到 40%左右。中低层干层的存在会增强云下水滴的蒸发过程，从而对地面降水产生很大的影响。风廓线（图 3b, d）显示低层为东南风，随着高度风向顺时针旋转逐渐变成东北风，再往高层为西南风。

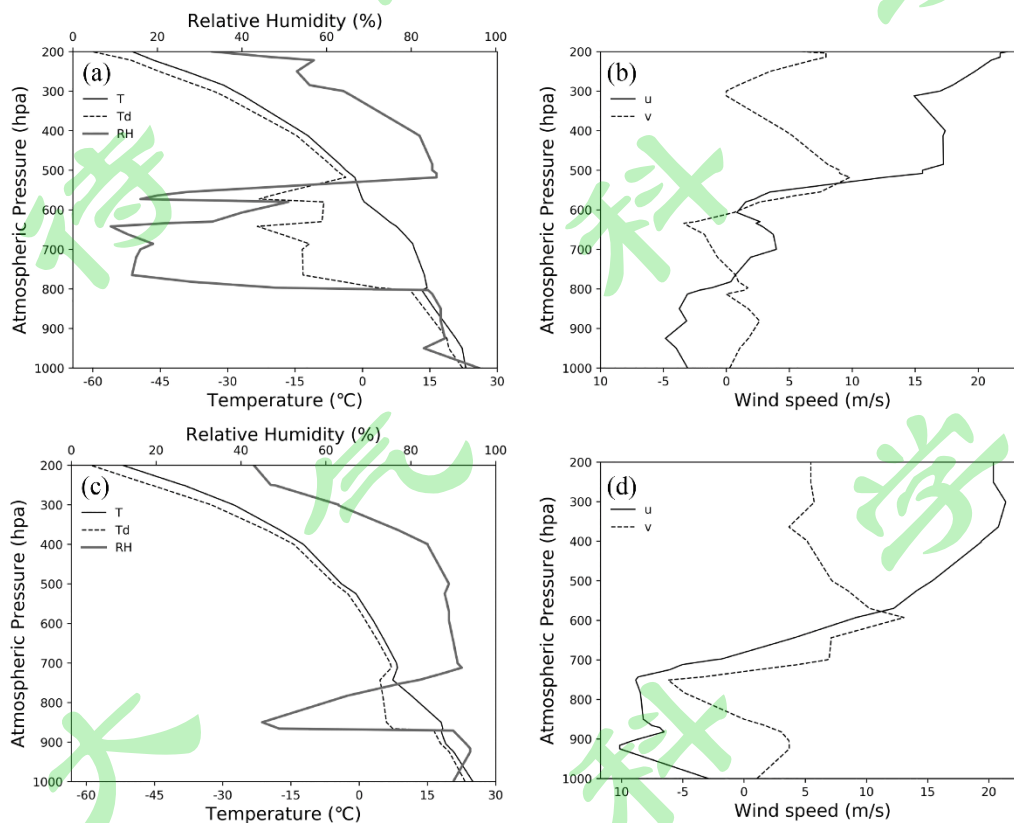


图 3 南京站 2014 年 8 月 16 日 00 时（第一行）和 12 时（第二行）探空曲线：（a, c）层结曲线（实线为温度，虚线为露点，灰色粗实线为相对湿度）；（b, d）环境风廓线（实线为 u 分量，正值代表西风；虚线为 v 分量，正值代表南风）

Fig.3 Sounding curves at 0000 UTC (first line) and 1200 UTC (second line) on 16 August 2014 over Nanjing: (a, c) Stratification curve (temperature (solid line), dew point (dashed line) and relative humidity (gray thick solid line)); (b, d) corresponding u (westly, solid line) and v (southly, dashed line) components of the horizontal wind

3 数值模式及试验设计

3.1 实验设计

本文使用中尺度数值模式 WRF（Weather Research and Forecasting）3.7 版本

开展数值模拟。采用单层网格设计，模拟区域设置如图 4 所示。模拟域的水平分辨率为 1.33 km，格点数为 601×601；垂直方向 41 层，分辨率从近地面层 70 m 到模式顶层 630 m。初始场和侧边界条件来自于 NCEP 的 1°× 1° FNL 再分析数据，其时间间隔是 6 小时，从 2014 年 8 月 16 日 00 时开始积分，到 2014 年 8 月 16 日 18 时结束，模拟时长 18 小时，积分时间步长为 6 秒，每隔 10 分钟输出一 次结果。物理方案的选择有 RRTMG 大气长波和太阳短波辐射方案 (Iacono et al., 2008)，YSU 边界层方案 (Hong et al., 2006)，陆面过程方案为热量扩散方案 (Thermal Diffusion Scheme) (Dudhia, 1996)。由于水平分辨率较高，故没有使用 积云参数化方案。

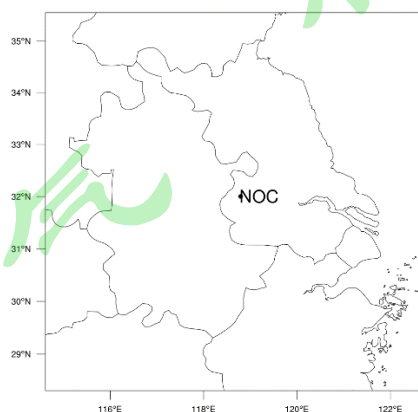


图 4 模拟区域。其中黑点表示南京奥林匹克体育中心场馆位置

Fig.4 Model domain. The black dot is the NOC location

考虑到 WRF 模式有多种微物理方案可供选择，并且不同的微物理方案可能会对模拟的云系结构和降水特性产生影响，为了获得青奥会开幕式降水过程的最优模拟效果，以便分析此次降水过程的云微物理特征以及进行后续的碘化银催化数值模拟，我们首先选择了八种不同显式微物理方案，在同一模拟设置的情况下进行敏感性试验并对比模拟结果。这八种方案是：Eta (Rogers et al., 2001)、Purdue Lin (Lin) (Lin et al., 1983)、WRF Single-Moment 6-class (WSM6) (Hong and Lim, 2006) 和 Goddard (Tao et al., 1989) 单参数方案，Thompson (Thompson et al., 2008) 和 WRF Double-Moment 6-class (WDM6) (Lim and Hong, 2010) 不完全双参数方案，以及 Milbrandt-Yau Double-Moment 7-class (Milbrandt-Yau) (Milbrandt and Yau, 2005a, 2005b) 和 NSSL Double-Moment (NSSL) (Mansell et al., 2010) 完

全双参数方案。表 1 详细列出了每种微物理方案的水成物预报量。

表 1 各微物理方案中的水成物预报量

云微物理方案	混合比预报量	数浓度预报量
Eta	$Q_c Q_r Q_s$	
Lin	$Q_c Q_r Q_i Q_s Q_g$	
WSM6	$Q_c Q_r Q_i Q_s Q_g$	
Goddard	$Q_c Q_r Q_i Q_s Q_g$	
Thompson	$Q_c Q_r Q_i Q_s Q_g$	$N_r N_i$
WDM6	$Q_c Q_r Q_i Q_s Q_g$	$N_c N_r$
Milbrandt-Yau	$Q_c Q_r Q_i Q_s Q_g Q_h$	$N_c N_r N_i N_s N_g N_h$
NSSL	$Q_c Q_r Q_i Q_s Q_g Q_h$	$N_c N_r N_i N_s N_g N_h$

3.2 不同微物理方案模拟的温湿特征

图 5 为南京站 12 时温度和露点温度的观测与模拟结果。对于温度廓线（图 5a），八种微物理方案的模拟与观测值整体较为吻合，而对于露点温度（图 5b），八种方案的模拟结果与观测值有一定差异。由观测值可知，在 700-900 hpa 高度上存在着干层，而 WDM6 方案没有模拟出干层，其余七种微物理方案均模拟出了干层，只是干层位置相对于观测略高位于 600-800 hpa。

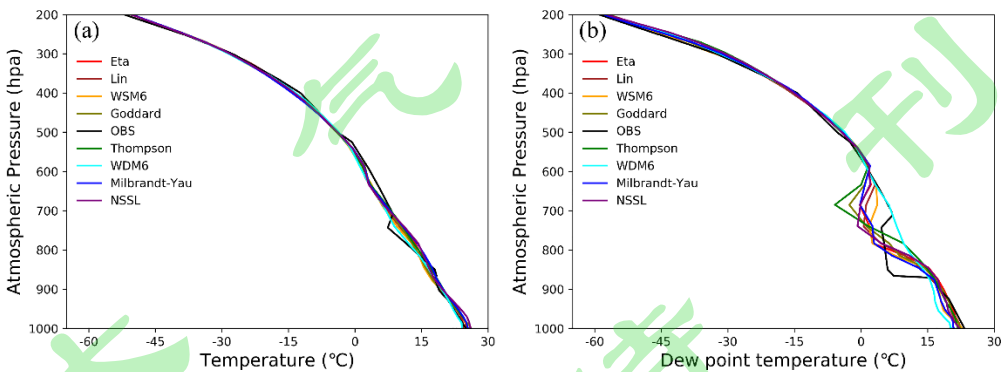


图 5 南京站 2014 年 8 月 16 日 12 时 (a) 温度和 (b) 露点温度垂直廓线的观测与不同微物理方案的模拟结果

Fig.5 Observed and simulated profiles of (a) temperature and (b) dew point temperature at Nanjing station at 1200 UTC on 16 August 2014

3.3 不同微物理方案模拟的云场结构

通过对水成物进行垂直积分，用液水路径（LWP）与冰水路径（IWP）之和代表云场，从而得到模拟云带的分布。图 6 为 2014 年 8 月 16 日 05 时不同微物理方案的模拟云场与可见光云图实测云场的对比。从可见光云图（图 6e）中可以看出，奥体场馆以北区域有一条呈西南-东北走向的带状云系，在场馆南部有大范围的云团覆盖。八种微物理方案都能较好的模拟出奥体场馆南部的大片云场，分布范围与实测云场也基本一致。对于位于奥体场馆北部的云带，八种方案也基本能够模拟出大致的云带走向，但强度偏弱。

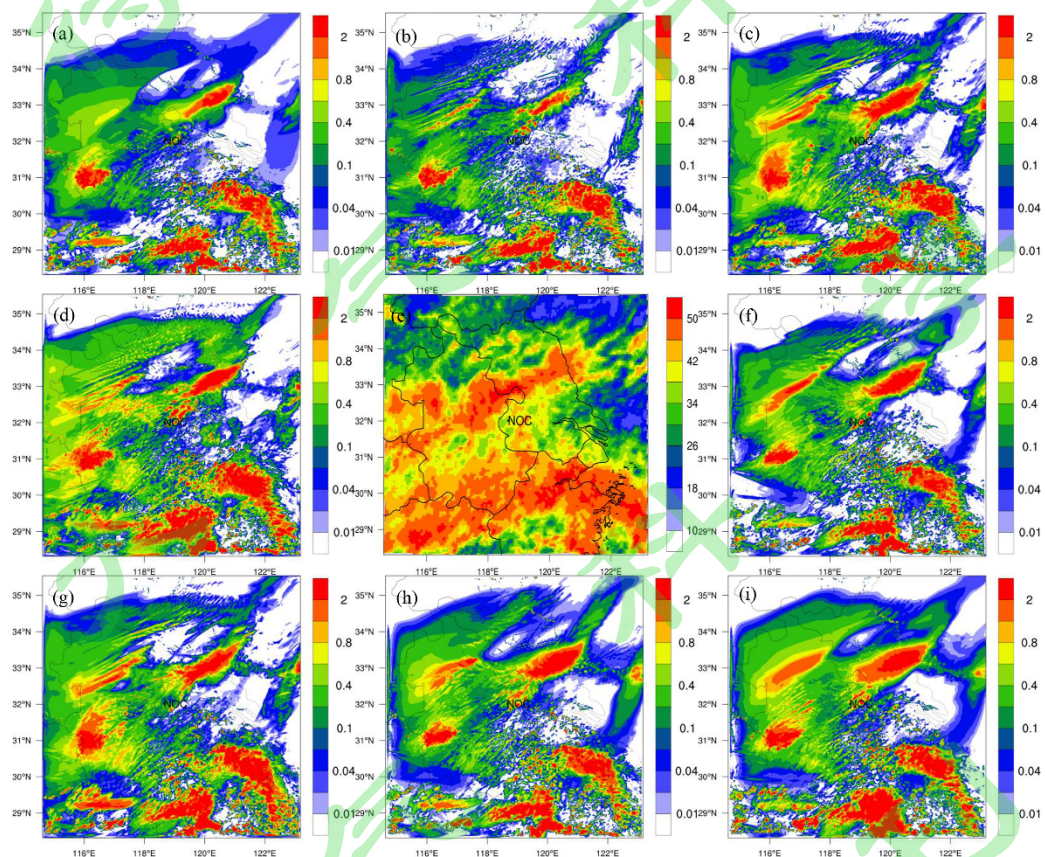


图 6 2014 年 8 月 16 日 05 时不同微物理方案模拟云场（单位： kg/m^2 ）与卫星观测云场（单位：%）对比：(a) Eta; (b) Lin; (c) WSM6; (d) Goddard; (e) 观测; (f) Thompson; (g) WDM6; (h) Milbrandt-Yau; (i) NSSL

Fig.6 The fields of simulated cloud with different cloud microphysics schemes (unit : kg/m^2) compared to observation (unit : %) at 0500 UTC on 16 August 2014: (a) Eta; (b) Lin; (c) WSM6; (d) Goddard; (e) Observation; (f) Thompson; (g) WDM6; (h) Milbrandt-Yau; (i) NSSL

图 7 为 05 时不同云微物理方案模拟的雷达回波与观测雷达回波的对比。与可见光云图（图 6e）相对应，观测雷达回波（图 7e）图中奥体场馆北部有一条呈东北-西南走向的回波。八种微物理方案都模拟出了回波的走向，其中 Eta、Lin 和 Goddard 方案模拟的雷达回波强度整体偏弱，WSM6、WDM6 和 NSSL 方案模拟的雷达回波带前部强度明显高于观测值。通过 05 时云场和雷达回波的模拟对比，可以发现 WSM6、Thompson、WDM6、Milbrandt-Yau 和 NSSL 方案的模拟效果相对较好。从 11 时雷达观测回波（图 8a）看，云系表现出典型的积层混合云的特征，奥体场馆地区北侧有一条呈西南-东北走向的带状回波，最大回波强度达到 45 dBZ。上述五个微物理方案基本上都模拟出了积层混合云的结构与雷达回波的走向，但位置略偏南。其中 WSM6、WDM6 和 NSSL 方案模拟的雷达回波大小和位置与观测对应较差。总体而言，Thompson（图 8c）和 Milbrandt-Yau（图 8e）两个方案的模拟结果与观测吻合相对较好。

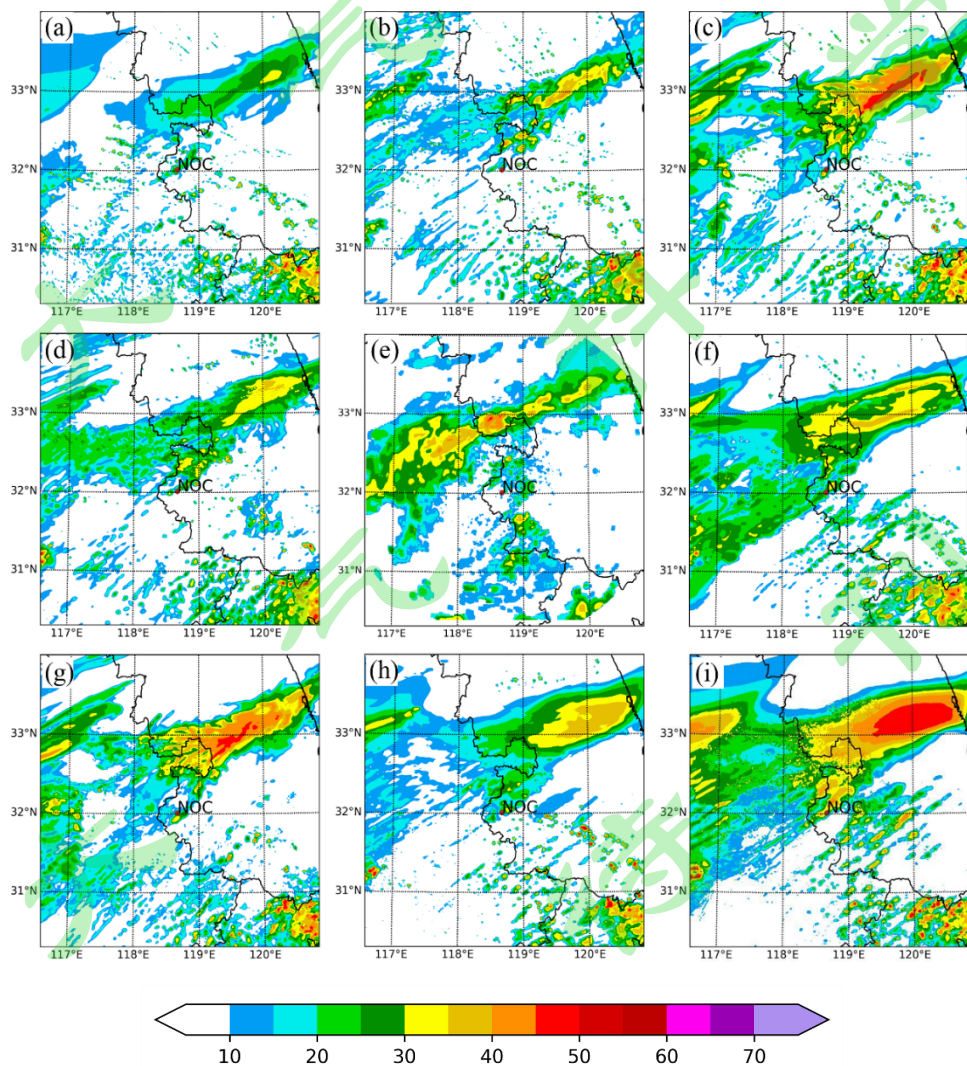


图 7 不同微物理方案模拟的组合雷达反射率与观测雷达组合反射率对比（05 时）：(a) Eta; (b) Lin; (c) WSM6; (d) Goddard; (e) 观测; (f) Thompson; (g) WDM6; (h) Milbrandt-Yau; (i) NSSL, 单位：dBZ

Fig.7 Composite radar reflectivity factor image in simulations with different cloud microphysics schemes compared to observation at 0500 UTC: (a) Eta; (b) Lin; (c) WSM6; (d) Goddard; (e) Observation; (f) Thompson; (g) WDM6; (h) Milbrandt-Yau; (i) NSSL, unit: dBZ

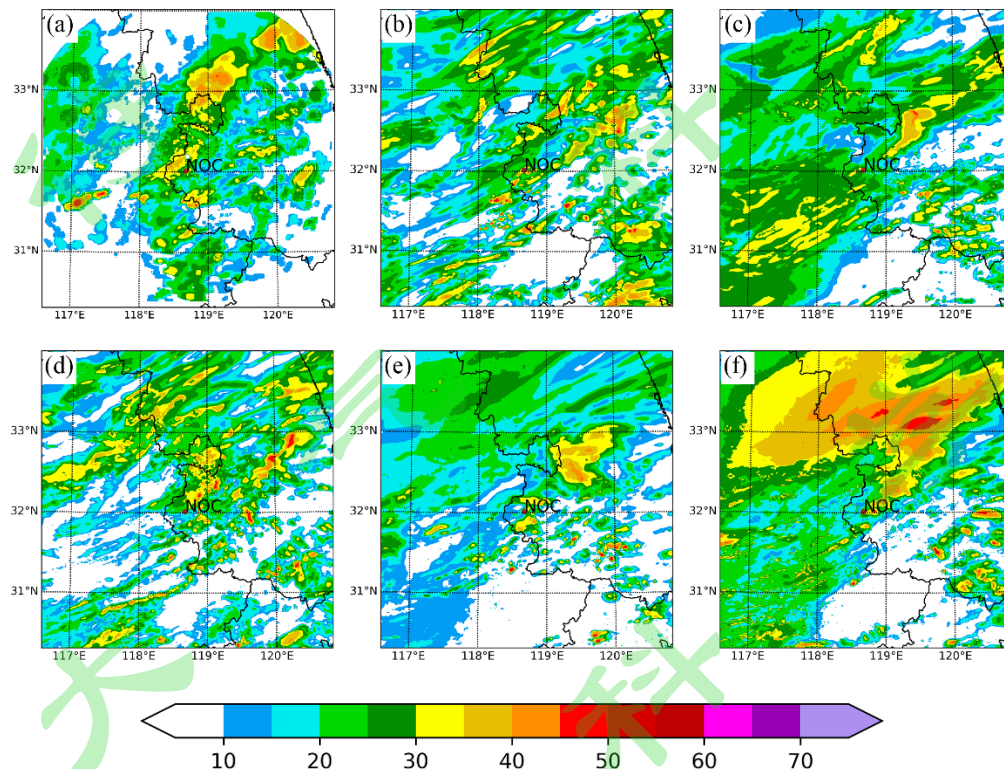


图 8 不同微物理方案模拟的组合雷达反射率与观测组合雷达反射率对比（11 时）：(a) 观测; (b) WSM6; (c) Thompson; (d) WDM6; (e) Milbrandt-Yau; (f) NSSL, 单位：dBZ

Fig.8 Composite radar reflectivity factor image in simulations with different cloud microphysics schemes compared to observation at 1100 UTC: (a) Observation; (b) WSM6; (c) Thompson; (d) WDM6; (e) Milbrandt-Yau; (f) NSSL, unit: dBZ

3.4 不同微物理方案模拟的降水比较

图 9 对比了 00 时至 10 时观测累积降水与不同微物理方案模拟的降水场，其中，降水实况取自气象站与 CMORPH 融合的降水量网格数据集（时间分辨率 1 小时、空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ）。从观测的地面 10 小时累计降水（图 9e）可

以看出，奥体场馆以北有一条呈西南-东北走向的雨带（影响奥体场馆降水的主要雨带），奥体场馆以南的浙江、安徽省一带有两个强降水中心。对比八组试验的模拟结果可以看到，Eta、Lin、WSM6、Goddard 和 WDM6 五个方案都没能很好地模拟出奥体场馆北部的雨带，而 Thompson、Milbrandt-Yau 和 NSSL 三个方案都较好地模拟出了这条雨带。对位于模拟域南部的大范围强降水，八种方案的模拟效果均较好，只是个别地区降水偏强。

综合比较八种微物理方案的模拟结果，Thompson、Milbrandt-Yau 和 NSSL 三个方案较好地模拟出此次降水过程。考虑到 Milbrandt-Yau 和 NSSL 两个双参数方案相近，我们选择 Thompson 和 Milbrandt-Yau 两个方案，基于它们的模拟结果进一步开展对比研究，分析图 9 中红色矩形框范围内的云系微物理结构，以确定奥体场馆区域降水形成的微物理机制，为后续理解人工催化奠定基础。

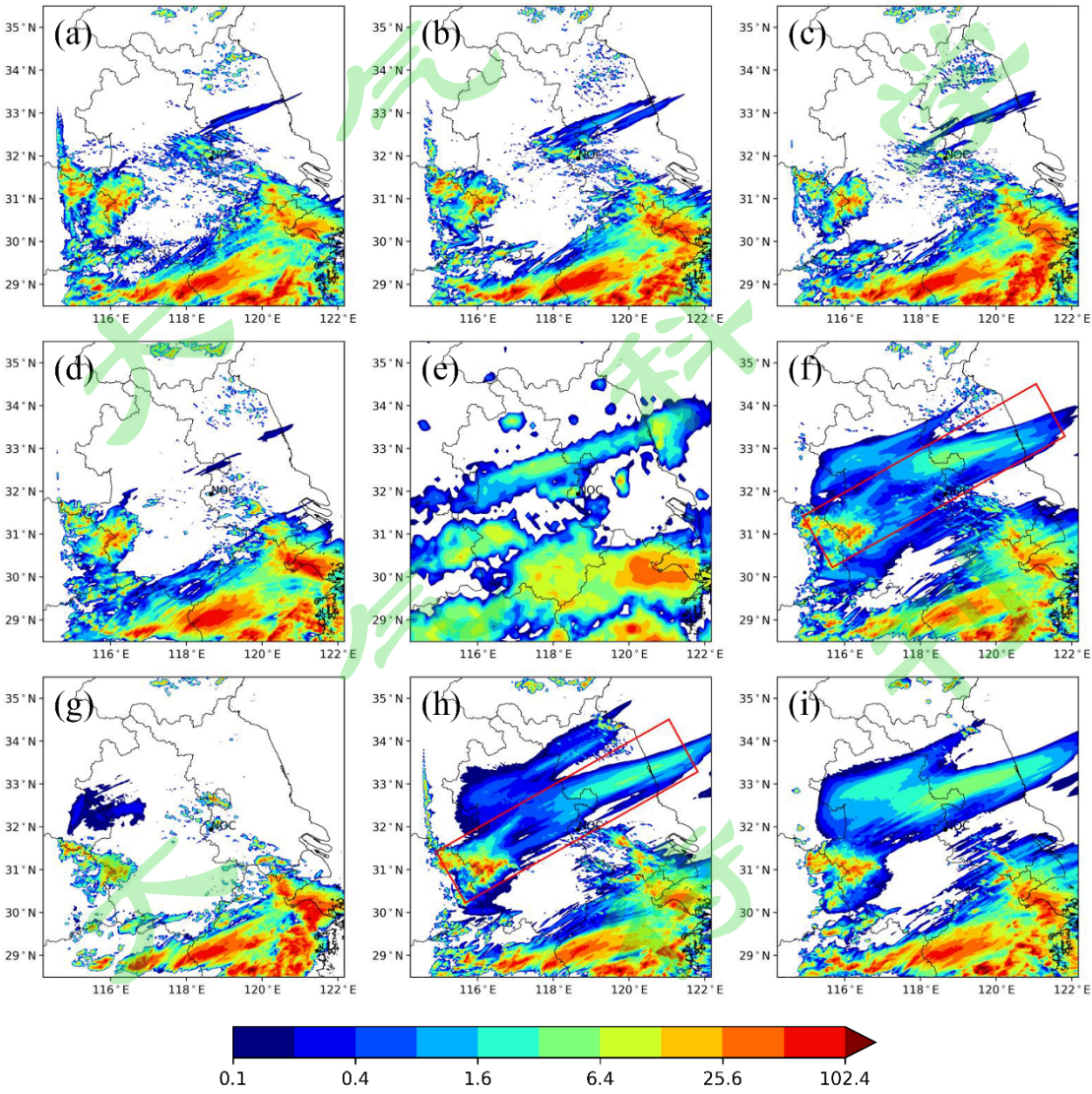


图 9 不同微物理方案 00 时至 10 时累积降水空间分布对比: (a) Eta; (b) Lin; (c) WSM6; (d)

Goddard; (e)观测; (f) Thompson; (g) WDM6; (h) Milbrandt-Yau; (i) NSSL, 单位: mm

Fig.9 The fields of accumulation precipitation in simulations with different cloud microphysics schemes compared to observation from 0000 UTC to 1000 UTC: (a) Eta; (b) Lin; (c) WSM6; (d) Goddard; (e)Observation; (f) Thompson; (g) WDM6; (h) Milbrandt-Yau; (i) NSSL, unit: mm

4 云微物理结构特征和降水微物理机制分析

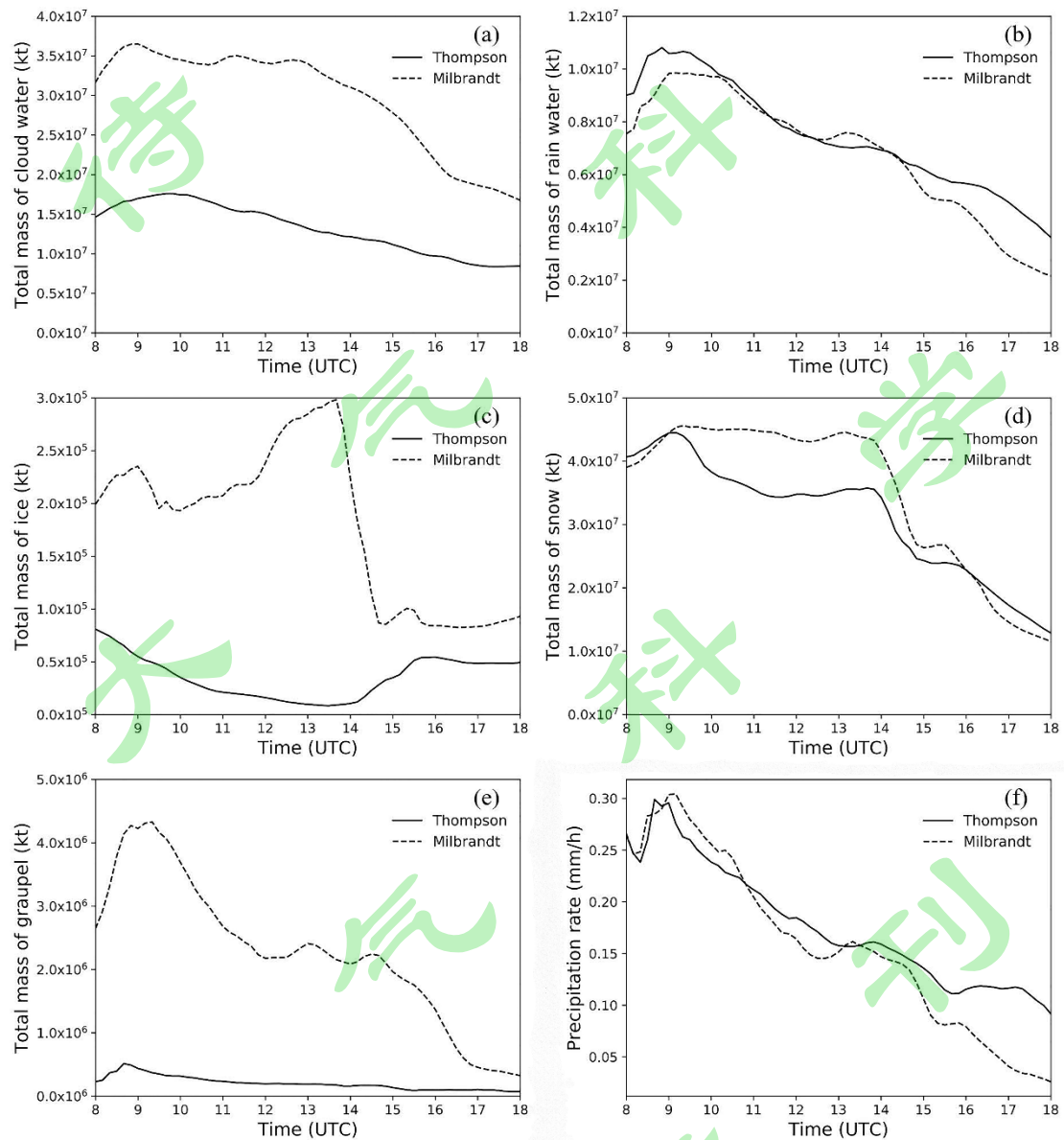


图 10 Thompson 方案（实线）和 Milbrandt-Yau 方案（虚线）模拟的不同水成物的空间积分总质量和区域平均降水率随时间变化: (a) 云水; (b) 雨水; (c) 冰晶; (d) 雪; (e) 霰; (f) 降水率

Fig.10 Time-dependent of domain-integrated total mass of different hydrometeor, and regionally averaged precipitation rate: (a) cloud water; (b) rain water; (c) ice; (d) snow; (e) graupel; (f)

precipitation rate . The solid and dashed lines represent the simulations with Thompson scheme and Milbrandt-Yau scheme, respectively

图 10 为图 9 中红色矩形框区域内，Thompson 方案和 Milbrandt-Yau 方案模拟的水成物的空间积分总质量以及区域平均降水率随时间变化。两个方案对于雨水（图 10b）、雪（图 10d）的总含量以及降水率（图 10f）的模拟，相对于其他水成物而言差别不大，但 Thompson 方案模拟的云水、冰晶和霰的总质量则明显低于 Milbrandt-Yau 方案。平均而言，Thompson 方案模拟的云水、雨水、冰晶、雪和霰在总水成物中所占的质量百分比分别为 25.3%、14.2%、0.1%、60.0%和 0.4%，冰相与液相分别占比 60.5%和 39.5%，并且以雪为主；Milbrandt-Yau 方案中，各水成物质量所占比例为云水 40.0%、雨水 9.2%、冰晶 0.2%、雪 47.4%、霰 3.0%和雹 0.2%，冰相和液相分别占比 50.8%和 49.2%，同样是以雪为主。

图 11 给出了 09 至 12 时，以南京奥体场馆（118.67°E, 32.01°N）为中心，沿经度（西-东）方向各水成物质量混合比及风场的垂直剖面图，其中左列为 Thompson 方案的模拟结果，右列为 Milbrandt-Yau 方案的结果。在中高层西南风的控制下，云系自西向东移动。09 时云中存在上升气流，最大上升气流速度为 2.1 m/s；冰晶分布在 10-12 km 高度，云水和雪主要分布在 5-10 km 高度，雨水位于雪之下的 0℃层（5 km 高度）以下的暖区；此时奥体场馆以西有雨水及地因而形成降水。10 至 11 时，上升气流减弱至 0.67 m/s，在 0℃ ~ -10℃区间仍存在较多的过冷云水和雪，并有少量冰晶。12 时，场馆以西仍有云存在，而在场馆以东云系有所发展，最大上升气流速度 1.3 m/s。本次降水过程由弱的积层混合云系产生，垂直运动发展较弱，降水量不大。

对比图 11 可以看出，两个方案模拟的云系结构特征基本一致，除了 Milbrandt-Yau 方案有冰雹出现。模拟的水成物含量还是有一定差异的。Thompson 方案的云水集中分布在 4-6 km 的高度区间，最大含量 0.93 g/kg；冰晶主要位于 10 km 左右的高层，含量很少仅为 0.001 g/kg；雪主要分布在 5-8 km 高度，含量丰富且分布范围广，最大含量达到 3.18 g/kg；霰粒子主要分布在 0℃层附近，最大含量 0.07 g/kg。对 Milbrandt-Yau 方案，云水含量最大值为 1.33 g/kg，也主要分布在 4-6 km 高度；冰晶和雹的含量很少，雪的最大含量 1.82 g/kg，霰粒子的

最大比含量为 0.63 g/kg，分布在 4-6 km 高度上。总体而言，虽然在水成物含量上有一定差异，但就过冷云水、雪和雨水的分布来说，两个方案是一致的。

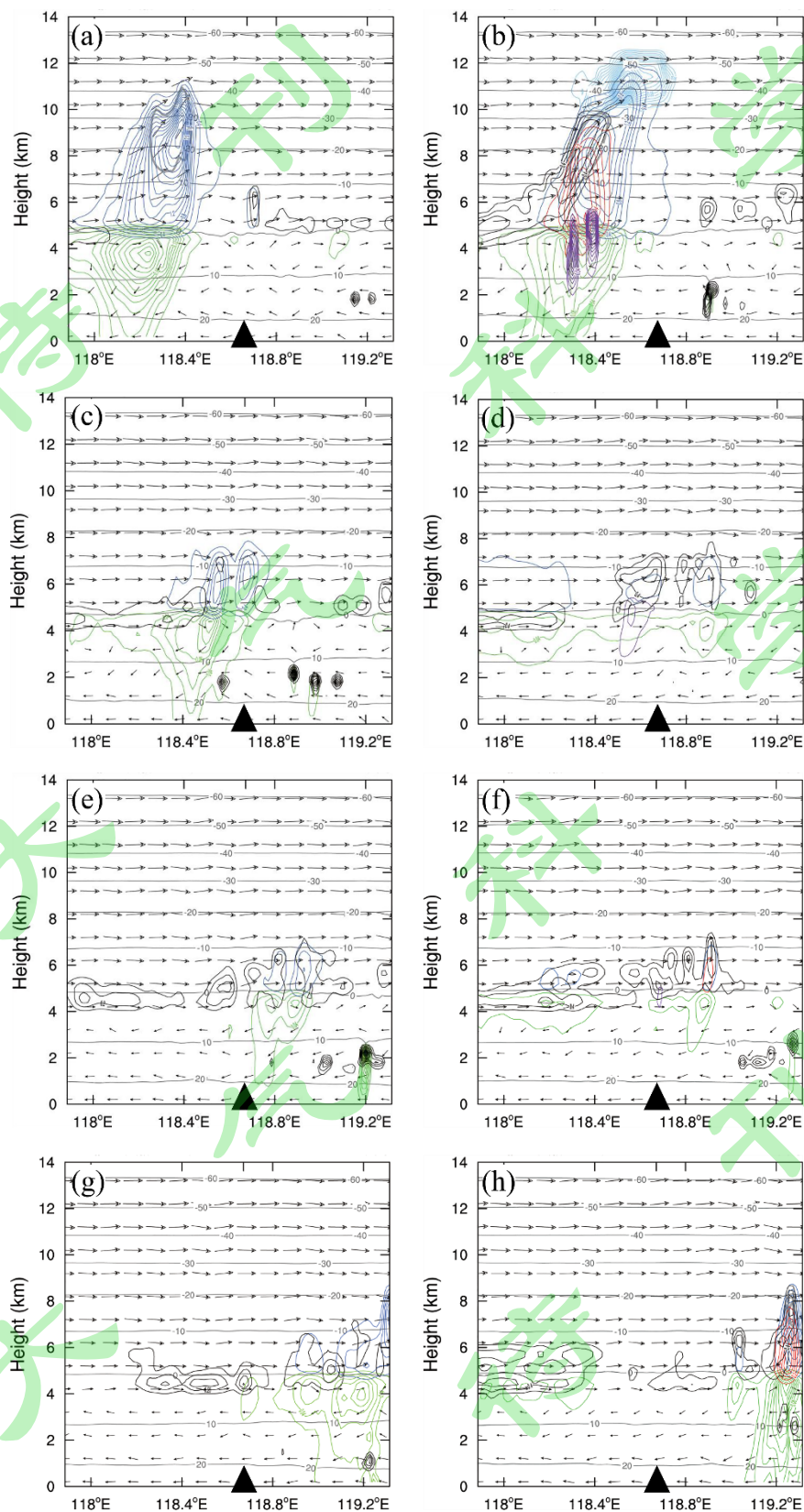


图 11 Thompson 方案（左列）和 Milbrandt-Yau 方案（右列）模拟的不同时刻云水（黑色）、雨水（绿色）、冰晶（浅蓝色）雪（深蓝色）、霰（红色）、和雹（紫色）混合比（单位: g/kg）沿经度方向上的垂直分布，箭头表示 u-w 风场: (a, b) 09 时; (c, d) 10 时; (e, f) 11 时; (g, h) 12 时。云水混合比等值线范围为 0 至 2 g/kg, 间隔为 0.1 g/kg; 雨水混合比等值线范围为 0 至 0.3 g/kg, 间隔为 0.02 g/kg, 冰晶混合比等值线范围为 0 至 0.2 g/kg, 间隔为 0.01 g/kg; 雪混合比等值线范围为 0 至 3.2 g/kg, 间隔为 0.2 g/kg; 霰混合比等值线范围为 0 至 0.7 g/kg, 间隔为 0.1 g/kg; 雹混合比等值线范围为 0 至 0.3 g/kg, 间隔为 0.02 g/kg; 灰细等值线为等温线, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 灰粗等值线为速度大于 1m/s 的上升气流区; 黑色三角表示南京奥林匹克体育中心场馆位置

Fig.11 The vertical cross sections of hydrometeor mixing ratio of cloud water (black contours)、rain water (green contours)、ice (light blue contours)、snow (dark blue contours)、graupel (red contours)、hail (purple contours) and winds (arrows) in different times of Thompson scheme (left column) and Milbrandt-Yau scheme (right column): (a, b) 0900 UTC (c, d) 1000 UTC; (e, f) 1100 UTC; (g, h) 1200 UTC. Cloud water mixing ratio contours range from 0 to 2 g/kg, with the interval of 0.1 g/kg, rain water mixing ratio contours range from 0 to 0.3 g/kg, with interval of 0.02 g/kg, ice mixing ratio contours range from 0 to 0.2g/kg, with the interval of 0.01 g/kg, snow mixing ratio contours range from 0 to 3.2 g/kg, with the interval of 0.2 g/kg, graupel mixing ratio contours range from 0 to 0.7 g/kg, with the interval of 0.1 g/kg, hail mixing ratio contours range from 0 to 0.3 k/kg, with the interval of 0.02 g/kg, the grey thin contours are isotherms, unit: $^{\circ}\text{C}$, the grey thick contours are updraft region, where air speed is faster than 1m/s, and the black triangle represents the NOC location

图 12 进一步给出了图 9 指定区域内 Thompson 和 Milbrandt-Yau 方案模拟的水成物的平均比含量随时间和高度的变化。Milbrandt-Yau 方案的云水含量相对较高且垂直伸展高达 10 km, 而 Thompson 方案的云水相对较少且主要分布在 8 km 以下, 但两者的高值区都在 4-6 km。冰晶的模拟差异较大: Thompson 方案含量较低且主要出现在 10 时 30 分以前, 高值区在 8-10 km; Milbrandt-Yau 的冰晶含量较高且长时间存在, 高值区在 10-12 km。雪的差异不大, 高值区都分布在 5-8 km 即 $0^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 区间上。霰也分布在 5-8 km 高度, 但含量比雪低, 且 Thompson

方案比 Milbrandt-Yau 方案要少。雨水主要在融化层以下，过冷雨水极少，雨水的时空分布两个微物理方案差异很小，除了 Thompson 方案在 10 时前含量略高。

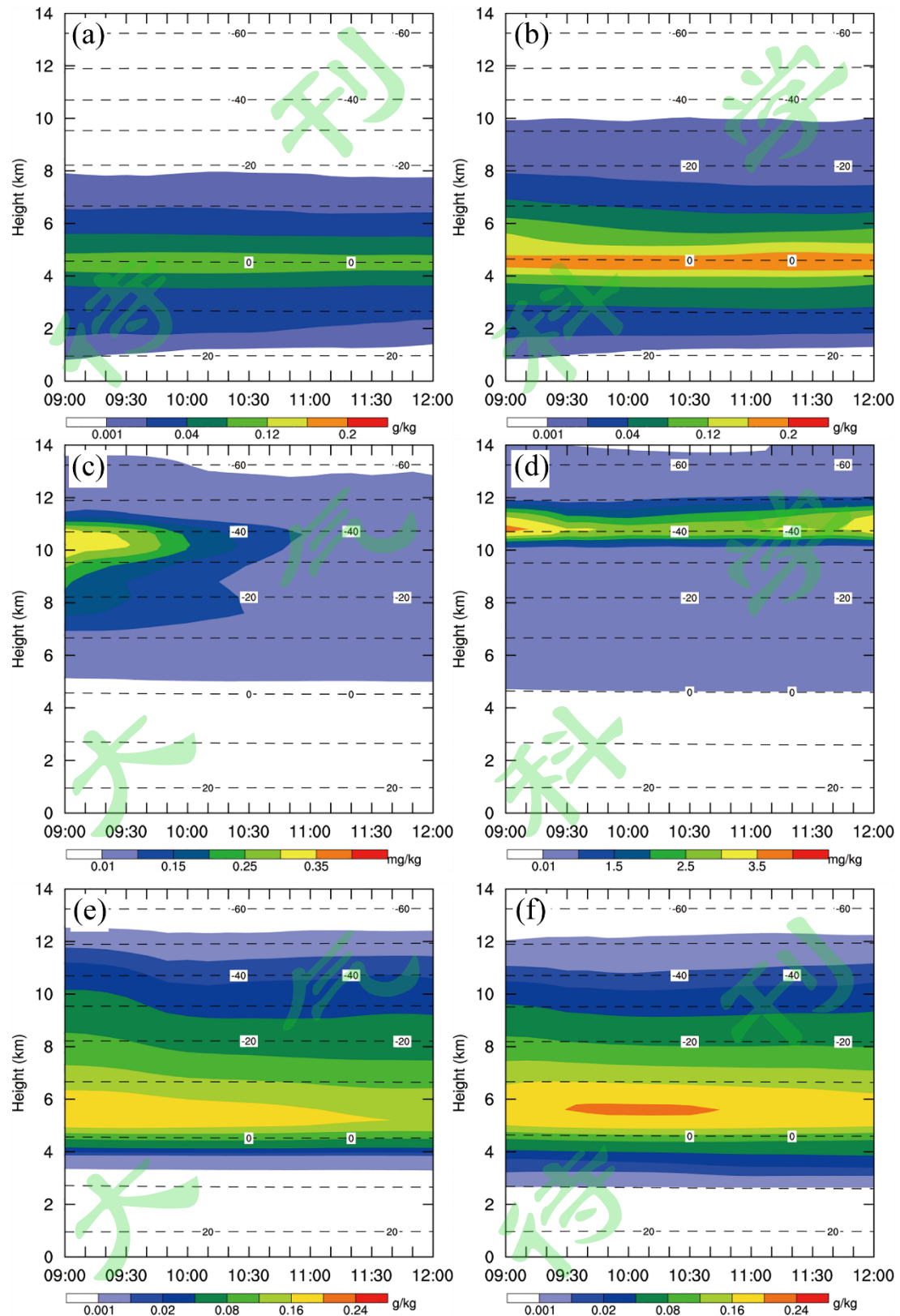


图 12 Thompson 方案（左列）和 Milbrandt-Yau 方案（右列）区域（图 9 红色矩形方框）平均的水成物质量混合比高度-时间分布：（a, b）云水；（c, d）冰晶；（e, f）雪；（g, h）霰；（i, j）雨；（k, l）雹。

j) 雨水。黑色虚线为等温线，单位：℃，除(c)和(d)的水成物含量单位是 mg/kg 外，其余均为 g/kg

Fig.12 Time-height distributions of regionally averaged (red rectangular box in Fig.9) hydrometeor mixing ratio in Thompson scheme (left column) and Milbrandt-Yau scheme (right column) : (a, b) cloud water; (c, d) ice; (e, f) snow; (g, h) graupel; (i, j) rain water, and the black dashed lines are isotherms, unit:℃, except (c) and (d), the unit of hydrometeors content is mg/kg, the rest are g/kg

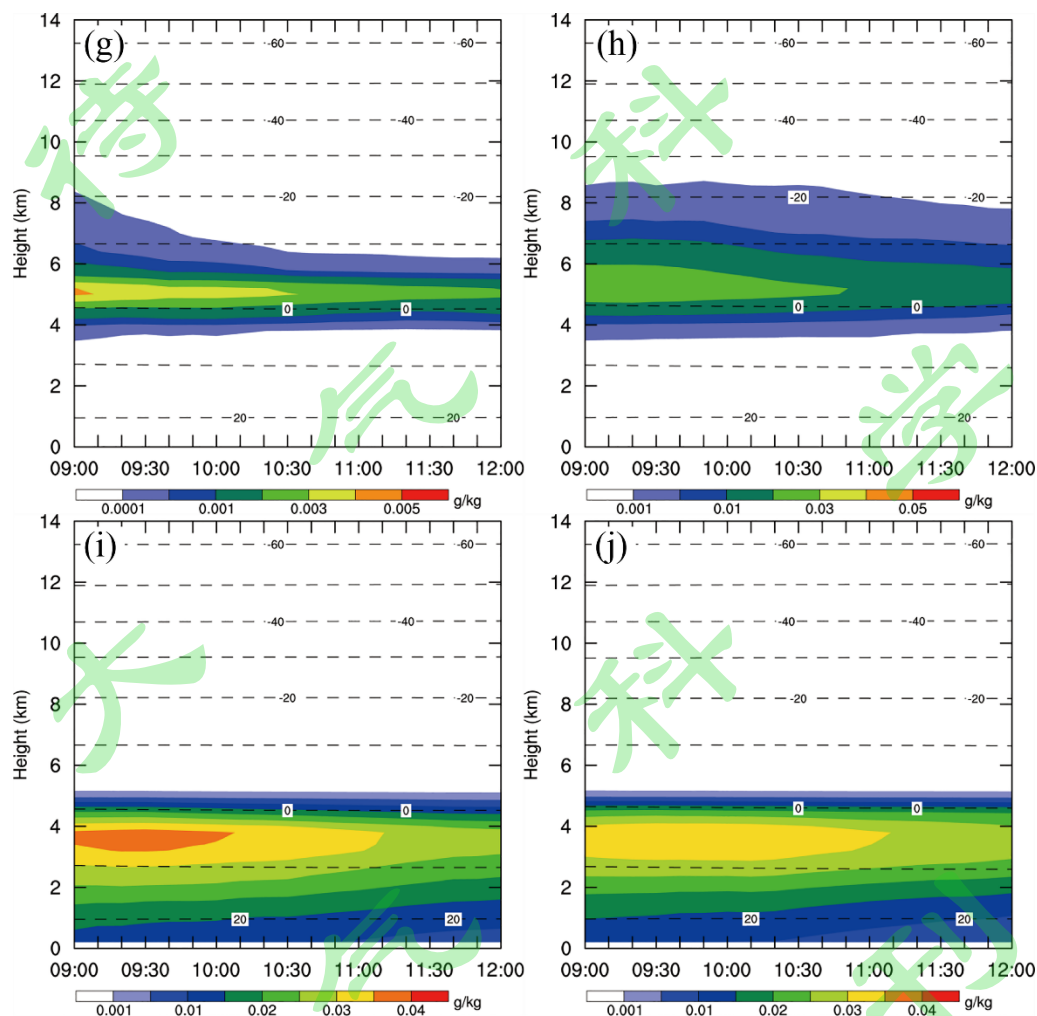


图 12 (续)

Fig.12 (Continued)

雨水主要来自雪的融化，不管是 Thompson 方案还是 Milbrandt-Yau 方案都得到了一致的结果（图 13a, b）。在 Thompson 方案中，雪融化（smlr）对雨水的贡献达到 72%，其次是雨滴碰并云滴增长(rcwr)，贡献率 24.8%，霰的融化(gmlr)对雨水的贡献很小仅 2.5%，而雨水的汇项主要是蒸发（revp）。在 Milbrandt-Yau

方案中，雪融化（smlr）对雨水质量的贡献率达到 60.0%，其次是雨滴碰并云滴增长（rcwr）占 20.4%，霰融化（gmlr）的贡献率 16.0%，雹融化（hmlr）贡献率约 3.6%。总体来看，Thompson 方案中降水性冰粒子（雪，霰）的融化对雨水质量的贡献达到 74.5%，而 Milbrandt-Yau 方案降水性冰粒子（雪，霰，雹）的融化对雨水质量的贡献为 79.6%。这说明，地面降水的产生主要来源于降水冰粒子的融化过程，其中雪的贡献最大，占主导地位。

从雪的源项微物理过程转化率（图 13c, d）看，Thompson 方案中雪形成的最主要微物理过程是凝华增长过程（sdep），其次是撞冻云水增长（scws）。在 Milbrandt-Yau 方案中，雪的主要源项同样是凝华增长过程（sdep），其次是撞冻云水增长（scws），云冰自动转化（iaus）对雪的形成也有一定贡献。

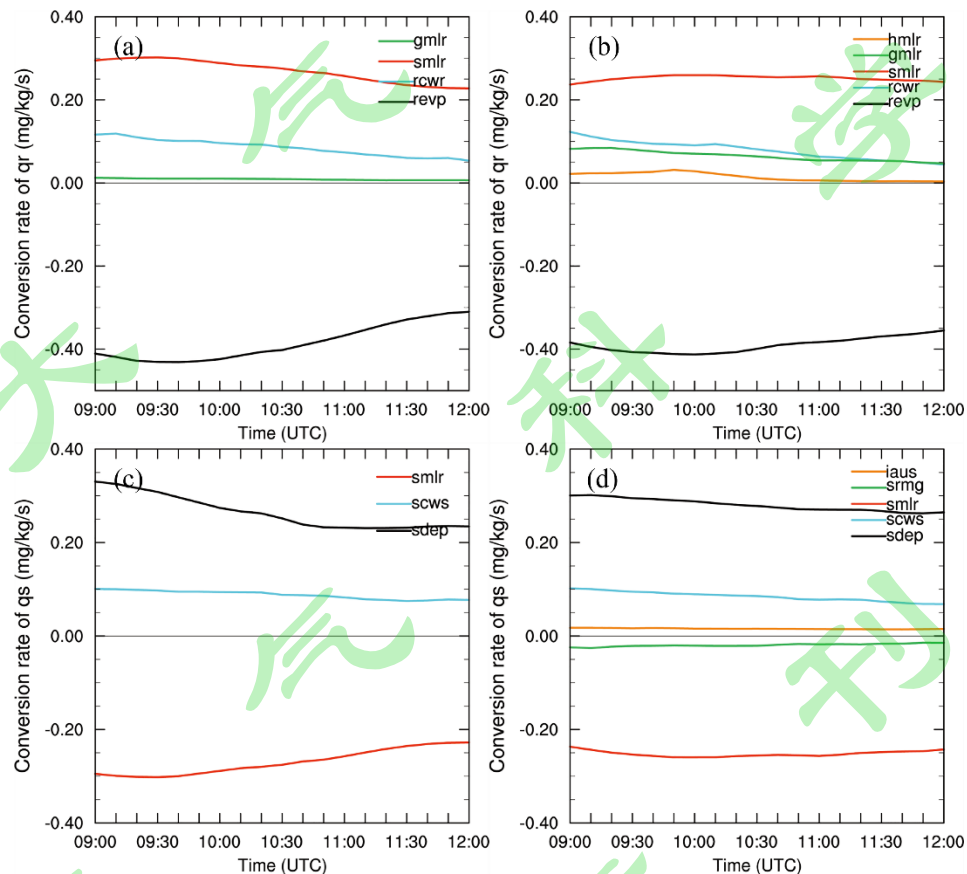


图 13 Thompson 方案（左列）和 Milbrandt-Yau 方案（右列）模拟的（a, b）雨水和（c, d）雪的源汇项微物理过程转化率随时间的变化（源项用正值表示，汇项用负值表示）。所有量均为图 9 指定区域的平均值，图中没有给出那些相对贡献很小的过程

Fig.13 Microphysical conversion rates over time of source terms and sink terms of (a, b) rain water and (c, d) snow in Thompson scheme (left column) and Milbrandt-Yau scheme (right column) (the

source term is represented by positive value and the sink term by negative value). All the quantities are averages of the regions specified in Fig.9, and the processes with relatively small contributions are not shown in the figures

结合雨水源汇项微物理过程转化率的垂直分布（图 14a, b）可以看到，雪的融化过程明显大于其他微物理过程，是雨水的最主要来源，其次是雨滴碰并云滴过程，而雪融化过程的高值区出现在 4 km 上下。雨水蒸发过程发生在 4 km 以下，高值区在 2.5 km 左右。融化层至地面大量的雨水蒸发正是由于中低层存在着较深厚的干层（图 3），这也是地面降水较少的一个原因，其中，Thompson 方案对雨水的消耗率为 94%，Milbrandt-Yau 方案对雨水的消耗率为 95.6%。从雪的源汇项过程转化率垂直分布（图 14c, d）看，雪形成的主要微物理过程在不同高度上有差异，在中高层（6-12 km）主要通过凝华增长，而在中层（4-6 km）主要通过撞冻云水增长。在 Milbrandt-Yau 方案中，部分雪是通过淞附过程转化成霰（srmg），使得雪的融化率小于 Thompson 方案。

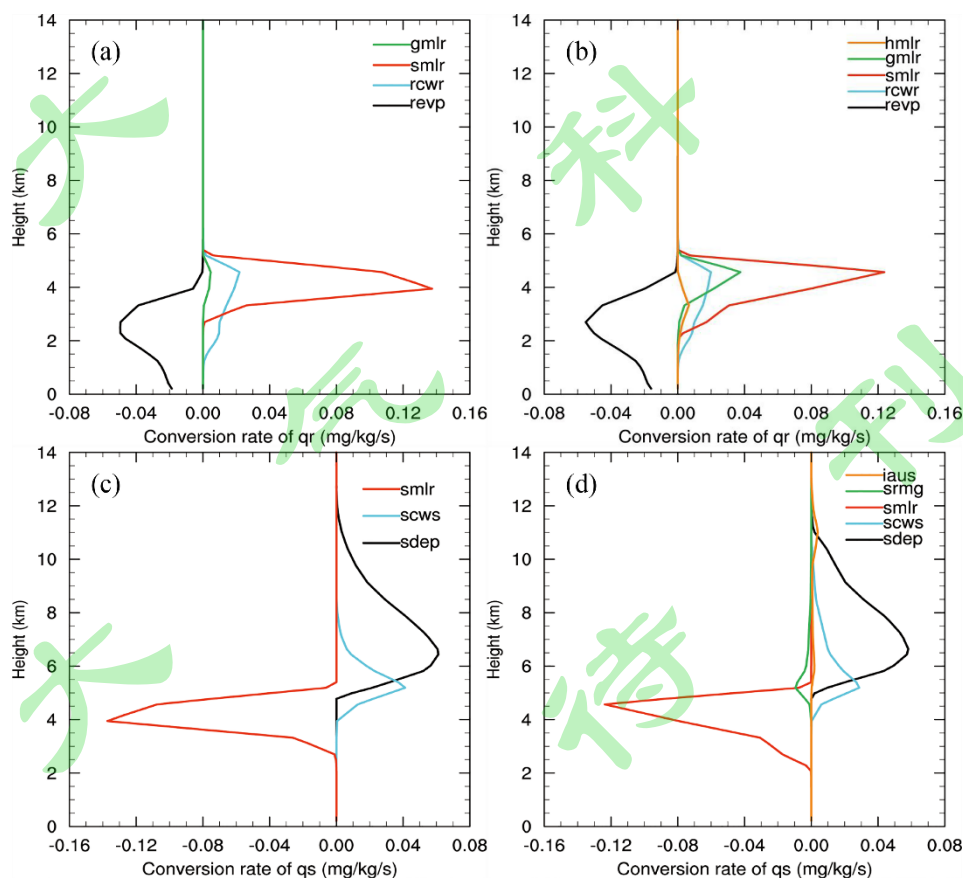


图 14 Thompson 方案（左列）和 Milbrandt-Yau 方案（右列）模拟的区域（图 9 红色矩形框）

平均的 (a, b) 雨水和 (c, d) 雪的源汇项微物理过程转化率的垂直分布 (9-12 时的平均值)

Fig.14 Vertical distributions of regionally averaged microphysical conversion rates of source terms and sink terms of (a, b) rain water and (c, d) snow in Thompson scheme (left column) and Milbrandt-Yau scheme (right column) (averaged from 0900 UTC to 1200 UTC)

5 总结

为模拟研究 2014 年 8 月 16 日南京青奥会开幕式日人工催化作业效果, 采用中尺度数值模式 WRF (3.7 版本), 对当日降水过程进行数值模拟。本文是系列研究的第一部分, 力图通过不同微物理方案的数值模拟, 了解云系的微物理结构特征和降水形成的微物理机制, 为下一步开展催化数值试验和评估催化效果奠定基础。

在选定的八种微物理方案中, 通过温湿特征、云场结构、雷达回波和累计降水的对比, 发现 Thompson、Milbrandt-Yau 和 NSSL 三种方案都能够较好地模拟出当日的降水过程, 而 Eta、Lin、WSM6、WDM6 和 Goddard 五个方案没能很好地模拟再现奥体场馆北侧的雨带。Thompson 和 Milbrandt-Yau 两个方案模拟的云系结构和降水形成的微物理机制是一致的, 尽管在水成物的含量上有一定差异。

模拟结果表明, 南京青奥会开幕式当天的降水过程由弱的积层混合云系产生。09 至 10 时, 云中有较强上升气流, 存在大量过冷云水, 雪含量高, 分布范围广, 冰相过程活跃; 10 至 12 时, 云系发展减弱, 在 $0^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 层有较多的雪存在。此次降水过程以冰相过程为主, 雪占水成物总质量的 50% 以上, 其主要通过凝华过程产生并撞冻云水增长。雪的融化是雨水的主要源项, Thompson 方案中雪的融化对雨水的贡献率为 72%, Milbrandt-Yau 方案为 60%; 蒸发则是雨水的主要汇项, Thompson 方案中蒸发对雨水的消耗率达 94%, Milbrandt-Yau 方案为 95.6%。

通过本文的数值模拟, 一方面了解到雪在雨形成过程中的重要作用, 另外也发现低空干层对地面降雨的减弱作用 (通过蒸发)。因此, 若能通过人工催化干预调节雪的形成增长过程, 同时增强云下雨水蒸发过程, 就应该能够起到消减雨的效果, 有关这一内容将在第二部分研究中讨论。

参考文献 (References)

- Chen B J, Xiao H. 2010. Silver iodide seeding impact on the microphysics and dynamics of convective clouds in the high plains [J]. *Atmos. Res.*, 96(2–3): 186–207.
- 陈宝君, 李爱华, 吴林林, 等. 2016. 暖底对流云催化的微物理和动力效应的数值模拟 [J]. *大气科学*, 40(2): 271–288. Chen Baojun, Li Aihua, Wu Linlin, et al. 2016. Modeling the microphysical and dynamical effects of silver iodide seeding of warm-based convective clouds [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40(2): 271–288.
- Ćurić M, Janc D, Vučković V. 2008. Precipitation change from a cumulonimbus cloud downwind of a seeded target area [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D11215, doi:10.1029/2007JD009483.
- Defelice T P, Golden J, Griffith D, et al. 2014. Extra area effects of cloud seeding – An updated assessment [J]. *Atmos. Res.*, 135–136(1): 193–203.
- Dudhia J. 1996. A multi-layer soil temperature model for MM5 [C]//The 6th PSU/NCAR Mesoscale Model Users Workshop, Boulder, CO, PSU/NCAR, 22–24.
- 郭学良, 付丹红, 胡朝霞. 2013. 云降水物理与人工影响天气研究进展 (2008~2012 年) [J]. *大气科学*, 37(2): 351–363. Guo Xueliang, Fu Danhong, Hu Zhaoxia. 2013. Progress in cloud physics, precipitation, and weather modification during 2008–2012 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(2): 351–363.
- 何观芳, 胡志晋. 1998. 不同云底温度雹云成雹机制及其引晶催化的数值研究 [J]. *气象学报*, 56(1): 31–45. He Guanfang, Hu Zhijin. 1998. Numerical study on ice seeding in hailstorms with various cloud base temperatures [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 56(1): 31–45.
- 何观芳, 胡志晋, 李淑日. 2001. 鄂西北对流云及其人工催化的三维数值模拟个例研究 [J]. *应用气象学报*, 12(增刊): 96–106. He Guanfang, Hu Zhijin, Li Shuri. 2001. Numerical simulation of rain enhancement experiment in northwestern Hubei Province of China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 12(Suppl.): 96–106.
- 何晖, 金华, 李宏宇, 等. 2012. 2008 年奥运会开幕式日人工消减雨作业中尺度数值模拟的初步结果 [J]. *气候与环境研究*, 17(1): 46–58. He Hui, Jin Hua, Li Hongyu, et al. 2012. Preliminary study of the mesoscale numerical simulation of the rain mitigation operation during the opening ceremony of the Beijing 2008 Olympic Games [J]. *Climate and Environment Research (in Chinese)*, 17(1): 46–58.
- Hong S Y, Lim J O J. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [J]. *J. Korean Meteor. Soc.*, 42: 129–151.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment

- processes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134(9): 2318–2341.
- 洪延超, 周非非. 2005. “催化—供给”云降水形成机理的数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 29(6): 885–896. Hong Yanchao, Zhou Feifei. 2005. A numerical simulation study of precipitation formation mechanism of “seeding—feeding” cloud system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 29(6): 885–896.
- 洪延超, 雷恒池. 2012. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考 [J]. *气候与环境研究*, 17(6): 951–967. Hong Yanchao, Lei Hengchi. 2012. Research advance and thinking of the cloud precipitation physics and weather modification [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 17(6): 951–967.
- 黄美元, 沈志来, 洪延超. 2003. 半个世纪的云雾、降水和人工影响天气研究进展 [J]. *大气科学*, 27(4): 536–551. Huang Meiyuan, Shen Zhilai, Hong Yanchao. 2003. Advance of research on cloud and precipitation and weather modification in the latest half century [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27(4): 536–551.
- 胡朝霞, 雷恒池, 郭学良, 等. 2007. 降水性层状云系结构和降水过程的观测个例与模拟研究 [J]. *大气科学*, 31(3): 425–439. Hu Zhaoxia, Lei Hengchi, Guo Xuiliang, et al. 2007. Studies of the structure of a stratiform cloud and the physical processes of precipitation formation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31(3): 425–439.
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D13103, doi:10.1029/2008JD009944.
- 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展 [J]. *大气科学*, 32(4): 967–974. Lei Hengchi, Hong Yanchao, Zhao Zhen, et al. 2008. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32(4): 967–974.
- Lim K S S, Hong S Y. 2010. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for weather and climate models [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138: 1587–1612.
- Lin H M, Wang P K, Schlesinger R E. 2005. Three-dimensional nonhydrostatic simulations of summer thunderstorms in the humid subtropics versus high plains [J]. *Atmos. Res.*, 78(1–2): 103–145.
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22(6): 1065–1092.
- Mansell E R, Ziegler C L, Bruning E C. 2010. Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 67(1): 171–194.
- 毛玉华, 胡志晋. 1993. 强对流人工增雨和防雹原理的二维数值研究 [J]. *气象学报*, 51(2): 184–194. Mao

- Yuhua, Hu Zhijin. 1993. The 2-D numerical study of rain enhancement and hail suppression principles on convective clouds [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 51(2): 184–194.
- Milbrandt J A, Yau M K. 2005a. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part I: Analysis of the role of the spectral shape parameter [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62(9): 3051–3064.
- Milbrandt J A, Yau M K. 2005b. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II: A proposed three-moment closure and scheme description [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62(9): 3065–3081.
- Rogers E, Black T, Ferrier B, et al. 2001. Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis [R]. NWS Tech. Procedures Bull. NOAA/NWS. 488.
- 史月琴, 楼小凤, 邓雪娇, 等. 2008. 华南冷锋云系的人工引晶催化数值试验 [J]. *大气科学*, 32(6):1256–1275.
- Shi Yueqin, Lou Xiaofeng, Deng Xuejiao, et al. 2008. Seeding numerical experiments of cold front clouds in South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32(6):1256–1275.
- 孙晶, 史月琴, 楼小凤, 等. 2010. 人工缓减梅雨锋暴雨的数值试验 [J]. *大气科学*, 34(2): 337–350.
- Sun Jing, Shi Yueqin, Lou Xiaofeng, et al. 2010. Numerical experiments on artificial seeding of decreasing the Meiyu heavy rainfall [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34(2): 337–350.
- 孙鸿娉, 李培仁, 闫世明, 等. 2011. 华北层状冷云降水微物理特征及人工增雨可播性研究 [J]. *气象*, 37(10): 1252–1261.
- Sun Hongping, Li Peiren, Yan Shiming, et al. 2011. A study of microphysical characteristics and seedability of cold stratiform clouds in North China [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 37(10): 1252–1261.
- Tao W K, Simpson J, Mccumber M. 1989. An ice-water saturation adjustment [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117(2): 231–235.
- Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136(12): 5095–5115.
- 叶家东, 范蓓芬, 杜京朝. 1998. 人工增雨试验中的反效果问题 [J]. *应用气象学报*, 9(3): 336–344.
- Ye Jiadong, Fan Beifen, Du Jingchao. 1998. Study of negative effects in artificial precipitation enhancement experiments [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 9(3): 336–344.
- 张蔷, 何晖, 刘建忠, 等. 2009. 北京 2008 年奥运会开幕式人工消减雨作业 [J]. *气象*, 35(8): 3–15.
- Zhang Qiang, He Hui, Liu Jianzhong, et al. 2009. Brief introduction of rain mitigation operation during Beijing 2008 Olympic Opening Ceremony [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 35(8): 3–15.

张蔷, 郭恩铭, 何晖, 等. 2011. 人工影响天气试验研究和应用 [M]. 北京: 气象出版社, 398pp. Zhang Qiang, Guo Enming, He Hui, et al. 2011. Experimental research and application of weather modification (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 398pp.

赵震, 雷恒池. 2008. 西北地区一次层状云降水云物理结构和云微物理过程的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 32(2): 323–334. Zhao Zhen, Lei Hengchi. 2008. A numerical simulation of cloud physical structure and microphysical processes associated with stratiform precipitation in Northwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(2): 323–334.